

MAPEAMENTO DE ÁREAS CAFEEIRAS (*Coffea arabica* L.) DA ZONA DA MATA MINEIRA USANDO SENSORIAMENTO REMOTO

Marley Lamounier Machado¹, Helena Maria Ramos Alves², Tatiana Grossi Chquiloff Vieira³,
Elpídio Inácio Fernandes Filho⁴, Marilusa Pinto Coelho Lacerda⁵

(Recebido: 2 de julho de 2009; aceito 14 de maio de 2010)

RESUMO: Objetivou-se, neste trabalho, estabelecer uma metodologia para o mapeamento de áreas cafeeiras da Zona da Mata mineira por meio do sensoriamento remoto, usando imagens de satélite e fotografias aéreas digitais não convencionais. Uma área piloto representativa da cafeicultura da região foi selecionada. O levantamento aerofotogramétrico não convencional da área de estudo, em escala 1:10000, foi realizado e uma imagem orbital ETM⁺Landsat7 foi adquirida. Essa imagem foi registrada e transformada para dados de reflectância de superfície. Limites das classes de uso da terra foram interpretados sobre o mosaico digital e sobrepostos à imagem, possibilitando a amostragem de cada cultura para fins estatísticos e verificação do comportamento espectral da vegetação. A análise estatística comprovou que as bandas 3, 4, 5 e 7 foram as mais representativas para a discriminação das coberturas vegetais. Apesar de a análise estatística ter indicado diferença significativa entre as bandas para os diferentes tipos de uso, as classificações não permitiram boa discriminação dos alvos devido ao efeito do sombreamento, ao relevo muito montanhoso da região e à similaridade espectral das coberturas, principalmente entre as classes de uso café e mata. A exatidão de mapeamento entre a imagem classificada e a fotointerpretação foi considerada de regular a fraca, sendo os melhores resultados obtidos por combinação de bandas. O uso de imagens orbitais ETM/Landsat7 para mapeamento das áreas cafeeiras na Zona da Mata indicou limitações, apesar dos poucos tipos de classe de uso. Tal fato resultou do sombreamento das imagens, em função da topografia acidentada, e da fragmentação da maioria das lavouras de café em talhões de pequena extensão.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, geotecnologia, imagem de satélite, aerofotogrametria, processamento digital de imagens.

MAPPING OF COFFEE LANDS (*Coffea arabica* L.) IN THE ZONA DA MATA REGION, MINAS GERAIS STATE, USING REMOTE SENSING

ABSTRACT: The aim of this work was to map coffee lands in the Zona da Mata region, in Minas Gerais state, using non-conventional aerial photographs and satellite images. A pilot area, representative of the regional coffee lands, was chosen. A non-conventional aerophotogrammetric survey of the study area was carried out (scale 1:10000) and an ETM⁺Landsat7 satellite image was acquired. This image was registered and transformed into surface reflectance data. Photointerpretation of the limits of land use classes was done over a digital mosaic. These limits were overlaid onto the image, providing reflectance sampling of each land use type for statistical analysis and assessment of the vegetation's spectral response. Statistical analysis showed that bands 3, 4, 5 and 7 were the most representative in the discrimination of vegetation canopies. Although statistical analysis showed a significant difference between the bands for the different land use/land cover types, the classifications did not provide good target discrimination due to shading, to the region's very steep landscape and to the spectral signature similarity between coffee and forest. The mapping accuracy between the classified image and photointerpretation was considered regular to weak and the best results were obtained through a combination of bands. The use of ETM/Landsat7 images to map coffee lands presented limitations, despite the few types of land use. This is due to the shading of the images, owing to the steep topography, and to the fragmentation of most of the coffee lands into small fields.

Index terms: *Coffea arabica*, geotechnology, satellite image, aerophotogrammetry, digital image processing.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização fisiográfica de uma região é a base para qualquer estudo ambiental. O

planejamento para o uso sustentado dos recursos naturais requer o conhecimento e a organização de informações atualizadas sobre o ambiente. A cartografia temática de ocupação de solo é uma

¹Engenheiro Agrimensor, Mestre em Agronomia, Pesquisador Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais/EPAMIG, Av. José Cândido da Silveira, 1647, Cidade Nova, 31170-000, Belo Horizonte, MG – marley@epamig.br

²Engenheira Agrônoma. PhD. Pesquisadora Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA CAFÉ – Autor de correspondência – Parque Estação biológica – PqEB, s/nº, Edifício Sede Embrapa, 70770-901, Brasília, DF - helena@epamig.ufla.br

³Engenheira Agrimensora, Mestre em Agronomia, Pesquisadora Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais/EPAMIG, Laboratório de Geoprocessamento, Epamig Sul de Minas, Caixa Postal 176, 37.200-000, Lavras, MG – tatiana@epamig.ufla.br

⁴Engenheiro Agrônomo, Doutor em Agronomia, Professor Adjunto do Departamento de Solos, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa/UFV, Av. PH Rolfs s/nº, 36570-000, Viçosa, MG - elpidio@solos.ufv.br

⁵Geóloga, Doutora em Agronomia, Professora Adjunta da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília/UnB, Caixa Postal 4508, 70910-970, Brasília, DF - marilusa@unb.br

ferramenta indispensável na tomada de decisão em ordenamento e planejamento do território e na definição de políticas de gestão de recursos naturais. Com essa cartografia pode-se conhecer o presente e planejar para o futuro (CAETANO et al., 2002). Alves et al. (2007) consideram que o conhecimento do uso da terra é indispensável para a análise dos processos agrícolas e ambientais, que deve ter como base planejamentos criteriosos subsidiados por estudos do meio físico e de sua dinâmica evolutiva. No Brasil, contudo, grande parte dos mapas de solos, vegetação e uso da terra ainda baseiam-se no projeto RADAM (BRASIL, 1987) e não fornecem detalhamento suficiente para planejamentos regionais, nem tampouco retratam a situação atual das regiões agrícolas do país. Segundo os autores, as técnicas convencionais de levantamento e atualização de informações sobre a cobertura e uso da terra caracterizam-se pelo alto custo e pela dificuldade de obtenção de dados em curtos períodos, o que constitui limitação para suas aplicações. A opção atual para o aumento da eficiência na coleta de dados primários sobre a superfície terrestre é o uso de geotecnologias, entre elas o sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica, associadas à utilização de imagens orbitais e técnicas de modelagem.

A imagem orbital é uma valiosa ferramenta para fins de mapeamento devido a sua característica multitemporal e multiespectral, sua maior abrangência em termos de área, possibilidade de análise visual e digital e, o que é mais importante, o baixo custo quando comparado às metodologias tradicionais. Desde o lançamento do primeiro satélite de observação da Terra, na década de 1970, vários métodos para o mapeamento do uso e ocupação de solo com base em imagens de satélite têm sido desenvolvidos. No início, isso era feito com base em análise visual em tudo semelhante à fotointerpretação de fotografias aéreas. Posteriormente, a pesquisa dedicou-se ao desenvolvimento de métodos baseados na análise automática de imagens (CAETANO et al., 2002). A viabilização de métodos automatizados de classificação digital que sejam eficazes, precisos e rápidos constitui um dos maiores desafios para a aplicação do sensoriamento remoto orbital no mapeamento do uso da terra. A definição da resposta espectral da cultura é uma das etapas na identificação das lavouras em imagens de satélites. A cultura

cafeeira, contudo, apresenta uma resposta espectral complexa, o que torna esse desafio muito maior (CARVALHO et al., 2004).

Segundo Moreira et al. (2007) quando as imagens de satélites possuíam pior resolução espacial, como as do sensor Multispectral Scanner (MSS)/Landsat, os resultados obtidos no mapeamento da cafeicultura por sensoriamento remoto, independentemente do procedimento adotado, foram desanimadores (VELLOSO, 1974; VELLOSO & SOUZA, 1976, 1978, citados por MOREIRA et al., 2007). A partir do lançamento do sensor Thematic Mapper (TM)/Landsat, Moreira et al. (2004) mostraram que a cultura do café pode ser mapeada em imagens de satélite de média resolução espacial com boa precisão, desde que o analista realize uma interpretação visual sobre os resultados da classificação automática. Os autores avaliaram o potencial das imagens adquiridas pelos satélites da série Landsat no mapeamento da cultura do café para a previsão de safras. Realizou-se uma análise temporal do comportamento espectral de lavouras de café-formação e café-produção por meio de imagens livres de nuvens, adquiridas nos anos de 1999 e 2001. As imagens do período seco foram mais eficientes no mapeamento de lavouras de café-formação e café-produção. As imagens da banda 4 dos dois sensores apresentaram melhor diferenciação espectral entre café e os demais alvos da cena. A reflectância do café-produção apresentou grande variabilidade entre lavouras. Segundo os autores, essa variabilidade pode ser atribuída, entre outros fatores, a diferenças na idade/porte das lavouras, no espaçamento/densidade de plantas e à variedade/cultivar, indicando a necessidade de trabalho de campo para a correta identificação das lavouras de café nas imagens Landsat.

Vieira et al. (2006) avaliaram a correlação entre parâmetros culturais e respostas espectrais da cultura cafeeira (*Coffea arabica* L.), em imagens TM/Landsat, a fim de estabelecer padrões de identificação dessa cultura por sensoriamento remoto. Para o estudo foram selecionadas áreas piloto em Patrocínio, região do Alto Paranaíba, e Machado, região Sul do estado de Minas Gerais. O Sistema de Informação Geográfica SPRING foi utilizado para tratamento dos dados e criação de um banco de dados geográfico. As respostas espectrais foram avaliadas pelas reflectâncias médias de talhões de café,

georreferenciados em campo. Dentre as quatorze variáveis avaliadas, a melhor correlação foi observada entre a reflectância medida na zona do infravermelho próximo e a porcentagem da área coberta pelas plantas, que agrupa ou representa, outras variáveis culturais do café, tais como porte, diâmetro, densidade, vigor vegetativo e produção média. Resultados semelhantes foram obtidos por Epiphany et al. (1994), que também utilizaram imagens do sensor Landsat 5/TM e dados coletados em campo para avaliação da influência dos parâmetros culturais do café sobre sua resposta espectral. A análise de regressão múltipla evidenciou a influência predominante dos parâmetros altura da planta e porcentagem de cobertura do terreno, na resposta espectral do dossel do cafeeiro.

Segundo Vieira et al. (2006), em função das características da cultura cafeeira, que apresenta grande variabilidade entre as lavouras e sobreposição espectral com áreas de mata, a definição de um padrão de identificação para o café é mais difícil que para outras culturas agrícolas. Contudo, os autores concluem que, em importantes regiões produtoras como o Cerrado, onde o relevo é mais suavizado, as lavouras ocupam grandes extensões e são mais homogêneas, imagens TM/Landsat podem ser usadas no levantamento e monitoramento de áreas cafeeiras. Lacerda et al. (2000) utilizaram a classificação supervisionada pelo classificador Maxver (máxima verossimilhança), na banda 4 de imagens Landsat para estimar as áreas cafeeiras das regiões do Cerrado e do Sul de Minas Gerais. Na região do Alto Paranaíba, o mapa gerado pelo classificador foi mais preciso. Já para o Sul de Minas, o mapa de uso da terra gerado pela classificação automática apresentou maior confundimento entre as classes mata e café, principalmente nas áreas onde o relevo era mais acidentado e as dimensões dos talhões menores. Os autores, da mesma forma que Vieira et al. (2006), atribuíram os resultados às condições geomorfológicas das duas regiões e suas relações com os sistemas de produção de café, bem diferenciados entre as duas regiões.

A Zona da Mata mineira constitui atualmente uma das principais regiões cafeeiras do Estado, mas ainda não possui mapeamentos de seu parque cafeeiro. O mapeamento por interpretação de imagens na microrregião da Zona da Mata apresenta como ponto favorável a pouca variedade de classes de uso da terra, predominando basicamente mata,

café e pastagem. Contudo, conforme evidenciado pelos autores citados anteriormente, o uso do sensoriamento remoto para a delimitação de áreas cafeeiras em regiões de topografia acidentada, com a ocorrência de matas nativas contíguas às áreas ocupadas pela cafeicultura, como é o caso da Zona da Mata Mineira, apresenta desafios maiores que em outras regiões do Estado. Contribuem para aumentar essa dificuldade a presença de nuvens na maior parte do ano, as coberturas fragmentadas e intercaladas e o maior sombreamento resultante das declividades elevadas das áreas onde é cultivado o cafeeiro na região. Todos esses fatores dificultam o processo de discriminação das coberturas vegetais.

Uma alternativa para a classificação do uso da terra sobre imagens de satélite seria o uso associado da fotografia aérea, empregada como referência de campo, devido a sua maior escala e riqueza de detalhes. A princípio, a confecção de cartas precisas empregando fotografias aéreas, só é possível com câmeras métricas, construídas especificamente para essa finalidade. No entanto, é possível utilizar outras câmeras não métricas e de pequenos formatos, desde que seus parâmetros de distorção sejam determinados. Esses sistemas são denominados levantamentos aéreos não convencionais ou de “pequeno formato” e constituem uma ótima ferramenta para o levantamento de informações detalhadas, facilitando a interpretação e o mapeamento necessário ao planejamento territorial, tanto no meio rural quanto no meio urbano. São fotografias coloridas ampliadas que permitem visão tridimensional e não têm marcas fiduciais (DISPERATI, 1991, 1998). A grande vantagem do uso dessa técnica é o baixo custo de aquisição das fotografias, devido ao uso de equipamentos mais simples em comparação com as provenientes de câmeras aerofotogramétricas. Como alternativa aos métodos cartográficos tradicionais, as aerofotos digitais ortofotizadas, na forma de “fotomapas digitais”, têm sido sugeridas como ferramenta para atualizações cartográficas (RAFFO & MENEZES, 1996, citados por CUNHA et al., 2006).

Cunha et al. (2006), Fernandes (1996) e Quinteiro (1997) utilizaram sistema aerofotogramétrico não convencional em avaliações do uso da terra e delineamentos semidetalhados de solos. Fernandes (1996) seguiu o método tradicional para a interpretação das aerofotos, através de estereoscópio de espelho e delimitação das diferentes unidades, com posterior

transferência dos dados interpretados para o mapa-base compilado de cartas topográficas. O autor concluiu que as aerofotos, na escala aproximada de 1:5000, permitiram um fácil mapeamento de unidades pedológicas da paisagem. Entretanto, o resultado não foi o mesmo quando foram usadas escalas menores. Quinteiro (1997), empregando aerofotos na escala aproximada de 1:15000, deduziu que essas apresentaram boa nitidez e estereoscopia para mapear os diversos usos da terra, mas encontrou dificuldades para mapear ambientes e separar as classes de solo em áreas de relevos acidentados.

Cunha et al. (2006) avaliaram a utilização de aerofotos não convencionais na forma de mosaico digital, como ferramenta básica no levantamento de solos e seu uso. O aerolevanteamento foi realizado em quatro microbacias do município de Guarapari, ES. Foram feitas oito faixas de sobrevôos fotográficos, com recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 40%. A partir da digitalização de fotografias com elementos no tamanho 9 x 9 cm na escala aproximada de 1:25000, produziu-se um mosaico digital com o auxílio do software Visual Stitcher. Os mapas de solos e de uso da terra foram delineados sobre o mosaico georreferenciado, com a utilização de digitalização em tela do software Idrisi 32. As aerofotos não convencionais apresentaram excelente efeito estereoscópico e nitidez, o que facilitou a identificação das classes de solos e seu uso. O uso de mosaicos georreferenciados produzidos a partir de aerofotos digitalizadas possibilitou a ampliação do uso das aerofotos para uma visão de conjunto da área de estudo. Os autores concluíram que o uso de aerofotos não convencionais de baixo custo na forma de mosaico digital foi eficiente, facilitando e agilizando o processo de levantamento dos solos e do uso da terra. Também concluíram que, em razão da possibilidade de obtenção de escalas detalhadas, as aerofotos tornam-se promissoras, especialmente no planejamento de pequenas bacias hidrográficas e áreas urbanas.

Uma das principais vantagens do sensoriamento remoto, por meio de imagens orbitais multiespectrais, é a possibilidade de distinção de diferentes materiais superficiais, sejam eles tipos de vegetação, padrões de uso do solo, rochas e outros. Para tal, pode-se empregar o estudo individualizado de bandas mais sensíveis ao alvo de interesse e

também aplicar técnicas de transformação da imagem buscando ressaltar as diferenças entre os alvos. Em muitos estudos, para melhorar a extração de informação, o analista faz uma transformação de bandas, como por exemplo, a análise de componentes principais e os índices de vegetação. Essas transformações podem ser tratadas da mesma forma que as bandas originais, no processo de extração de informação (CAETANO et al., 2002; JI, 1996; SHEVYRNOGOV & SIDKO, 1995).

Os índices de vegetação desenvolvidos para detectar a vegetação verde são, geralmente, baseados no contraste entre a reflectância das bandas do vermelho e infravermelho-próximo, que é característico da absorção de clorofila. Entre os principais índices de vegetação utilizados incluem-se o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para Solo).

A transformação por componentes principais pode ser resumida da seguinte forma: dadas N imagens brutas (sem qualquer outro tipo de processamento), são analisadas as correlações entre elas e produzido um novo conjunto de N novas imagens, com nenhuma correlação entre si. De modo geral, esse novo conjunto de imagens terá as seguintes características: a primeira delas, chamada de 1ª principal componente, ou PC1, irá conter a informação que é comum a todas as N bandas originais; a segunda, ou PC2, irá conter a feição espectral mais significativa do conjunto e assim, sucessivamente, as PCs de ordem mais alta irão conter feições espectrais cada vez menos significantes, até a última PC, que concentrará, então, a informação que sobrar (CROSTA, 1999).

Objetivou-se, neste trabalho, uma metodologia para mapeamento de áreas cafeeiras da Zona da Mata de Minas Gerais por meio do sensoriamento remoto, usando imagens de satélite e fotografias aéreas digitais não convencionais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo posiciona-se geograficamente entre as coordenadas plano-retangulares E 190.274 - 203.466 m e N 7.763.834 - 7.755.416 m, Sistema de Projeção UTM, Fuso 24, Datum WGS84 (Figura 1), com área aproximada de 111 Km². O clima é o Cwb, segundo a classificação de Köppen. A vegetação é

caracterizada por um tipo de vegetação subarbórea, arbustiva ou herbácea.

Os dados referentes ao uso atual da terra foram extraídos de imagens do satélite ETM+/LANDSAT7 (Enhancement Thematic Mapper Plus), órbita/ponto 216/74, bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 para a data de 28 de Junho de 2000, em que a imagem apresentou uma menor quantidade de nuvens e uma maior visibilidade.

Foram usadas fotografias aéreas verticais não convencionais coloridas provenientes do levantamento feito pelo Núcleo de Estudos para Uso da Terra (NEPUT), da Universidade Federal de Viçosa, no mês de Agosto de 2000. A altura média de vôo foi de 2000 m e a escala foi de, aproximadamente, 1/10000.

O software utilizado foi o Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING), do Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais – INPE (CÂMARA et al., 1996). Para o georreferenciamento dos dados em campo utilizou-se GPS do tipo navegação.

A análise estatística foi feita usando as fontes de variação: banda espectral, cobertura e exposição em relação ao sol, utilizando o modelo estatístico fatorial (Banda vs. Cobertura vs. Exposição). O teste de média utilizado foi o de Tukey, com grau de confiança de 95%. O fator exposição resulta do fato de uma mesma cobertura estar iluminada ou sombreada, por causa da elevação do sol e topografia acidentada.

Executou-se o aerolevantamento da área. Depois de reveladas as fotografias, procedeu-se à montagem do mosaico digital, que foi georreferenciado em campanha de campo. Procedeu-se, em seguida à fotointerpretação e digitalização das principais classes de uso da terra. As classes de uso da terra extraídas da fotointerpretação foram aquelas com porcentual

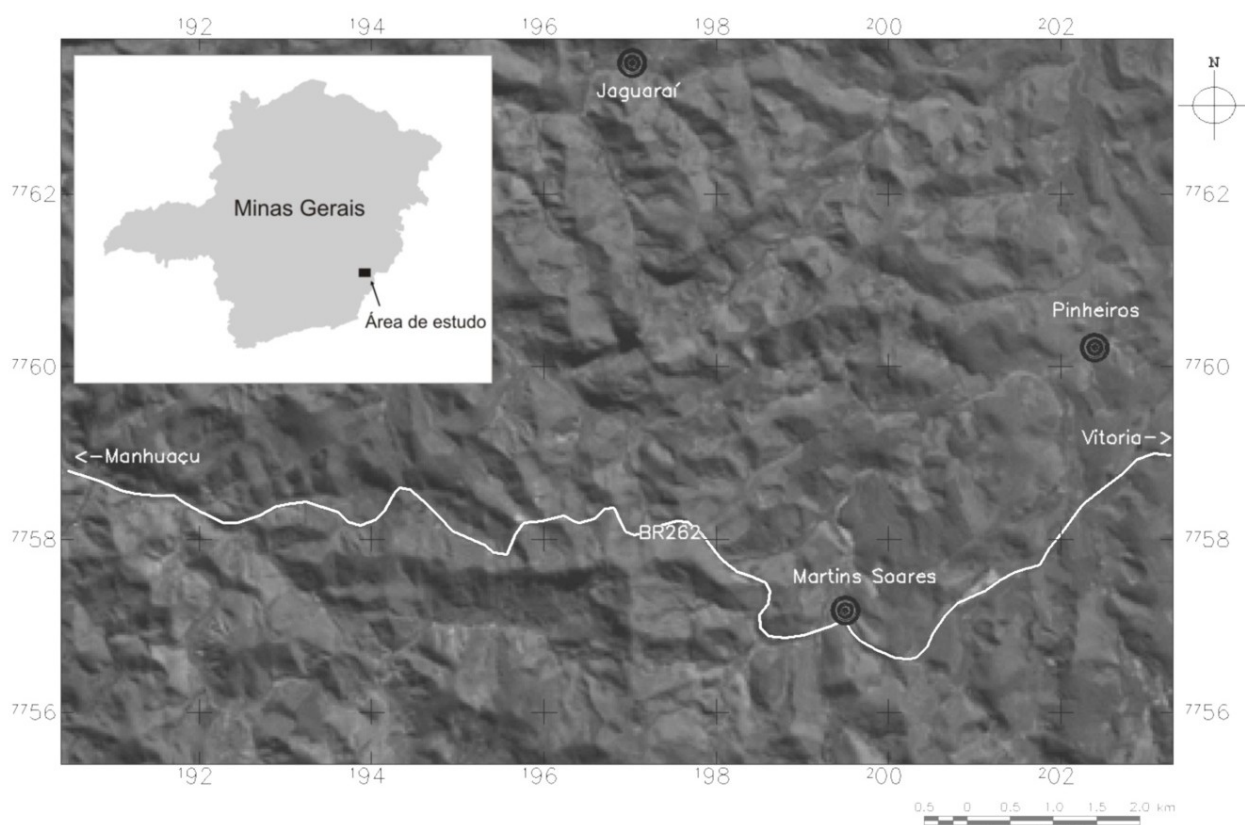


Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo.

vegetativo representativo: café-produção, café-formação, mata, pastagem natural, pastagem formada e reflorestamento. As classes restantes foram consideradas como áreas não classificadas.

As imagens foram registradas e posteriormente transformadas de seu estado original para dados de reflectância de superfície, segundo recomendações de Markham & Barker (1986). As áreas da imagem e do mosaico foram recortadas dentro do mesmo limite de forma a permitir a comparação entre classificado e referência de campo (interpretação do mosaico). Limites das classes interpretadas sobre o mosaico digital foram sobrepostas à imagem. Assim, foi possível fazer amostragem espectral para cada cultura, dentro da imagem, para todas as bandas do Landsat 7, possibilitando a realização da análise estatística e a verificação das diferenças para bandas e cultura.

As classificações foram feitas de forma supervisionada, usando o algoritmo MAXVER (máxima verossimilhança) disponibilizado pelo SPRING. O treinamento do classificador também foi feito sobre os limites definidos pela interpretação do mosaico digital sobreposto à imagem. A amostragem para classificação foi feita apenas para as classes caracterizadas como cobertura vegetal (mata, pastagem formada, café-produção e café-formação e pastagem natural), para áreas sombreadas e iluminadas. As classificações foram feitas usando como base as bandas que melhor diferenciaram as coberturas, segundo os resultados obtidos pela análise estatística. Além dessas, usou-se, ainda, a combinação entre elas e mais as transformações de imagem por NDVI, SAVI, Componentes Principais e a transformação do tipo "Brightness", proveniente do método proposto por Hall et al. (1991).

A exatidão da classificação foi medida pelo índice Global e pelo índice Tau. O índice Global dado por Campbell (1987) é dado por:

$$observado = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ii}}{N} \quad (1)$$

Onde N é o número total de pixels classificados, M o número de classes e n_{ii} os pixels classificados corretamente para cada classe, ou seja, a soma dos

valores da diagonal dividida pela soma total dos pixels classificados.

O índice Tau é dado por:

$$T_e = \frac{P_0 - \frac{1}{M}}{1 - \frac{1}{M}} \quad (2)$$

Onde M é número de classes e P_0 o valor observado (1).

A tabulação cruzada entre o mapa de referência de campo (mosaico digitalizado) e as diferentes classificações supervisionadas é chamada de matriz de confusão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapeamento por interpretação de imagens na microrregião da Zona da Mata apresenta um ponto favorável, que é a pouca variedade de classes de uso da terra, predominando, basicamente, mata, café e pastagem. Por outro lado, a presença de nuvens na maior parte do ano, as coberturas fragmentadas e intercaladas, a topografia acidentada e, conseqüentemente, o sombreamento, são os fatores negativos que dificultam o processo de discriminação das coberturas.

A Tabela 1 apresenta a estatística entre bandas e classes de uso e ocupação da terra para as bandas do Landsat 7 e exposição de vertentes iluminadas e sombreadas.

A partir do resultado da análise estatística apresentado na Tabela 1, as bandas 3, 4, 5 e 7, mais representativas estatisticamente para distinção de coberturas vegetais, foram selecionadas para a realização da classificação e mapeamento do uso da terra. Apesar dessas bandas terem sido atribuídas estatisticamente para melhor representar uma determinada cobertura vegetal, elas foram usadas para discriminar todas as outras coberturas. A partir dessas bandas, usou-se também a combinação dupla e tripla entre elas no processo de classificação supervisionada.

As imagens transformadas por componentes principais (PC) usadas na classificação foram a primeira, com 74.7% das informações, e a segunda, com quase 23.4%. Devido à menor quantidade de informações, a segunda imagem entrou somente em combinação com a primeira.

A partir da matriz de confusão para os diferentes tipos de transformações calculou-se o índice Tau e os valores do índice Global de acertos, conforme Tabela 2.

Tabela 1 – Valores médios de reflectância das diferentes coberturas vegetais, em condições de exposição iluminada e sombreada para as bandas da imagem Landsat7.

Banda Landsat7	Exposição	Café-Produção	Café-Formação	Mata	Pastagem Formada	Pastagem Natural
1	Iluminada	3,10Aa ¹	5,13Aba	2,70 Aa	4,23ABa	10,80ABa
	Sombreada	2,97Aa	5,63Aa	3,17Aa	3,13Aa	3,50Ab
2	Iluminada	12,67Aa	16,83ABa	11,97Aa	16,10ABa	22,43Ba
	Sombreada	9,10Aa	14,20Aa	7,40Aa	11,87Aa	11,43Ab
3	Iluminada	9,80Aa	19,50Ba	6,87Aa	9,67Aa	30,60Ca
	Sombreada	4,93ABa	6,00ABb	2,43Aa	6,20ABa	10,43Cb
4	Iluminada	98,77Ca	81,47Aa	91,33Ba	134,97Da	75,27Aa
	Sombreada	56,33Bb	53,20Bb	39,73Ab	86,77Cb	42,63Ab
5	Iluminada	52,03ABa	79,47Ca	48,97Aa	57,43Ba	107,43Da
	Sombreada	28,63Bb	27,83Bb	17,87Ab	38,13Cb	39,63Cb
7	Iluminada	27,73Aa	57,23Ba	23,80Aa	26,07Aa	89,23Ca
	Sombreada	12,27Bb	31,63Db	4,13Ab	15,67Bb	23,87Cb

¹ Médias acompanhadas de mesma letra maiúscula na horizontal não diferem significativamente ao nível de 5%. Médias acompanhadas de mesma letra minúscula entre tipos de exposição para cada banda não diferem significativamente, ao nível de 5%.

Tabela 2 – Índice Global (IG) e índice Tau de acerto das classificações

Imagem/Transformação	IG	Tau
PC1	0,27	0,12
Combinação PC1 e PC2	0,40	0,28
NDVI	0,42	0,31
SAVI	0,36	0,23
BRIGHTNESS	0,25	0,09
Banda 3	0,31	0,17
Banda 4	0,33	0,20
Banda 5	0,27	0,12
Banda 7	0,29	0,14
Combinação Bandas 3 e 4	0,42	0,31
Combinação Bandas 3 e 5	0,36	0,24
Combinação Bandas 3 e 7	0,32	0,19
Combinação Bandas 4 e 5	0,41	0,29
Combinação Bandas 4 e 7	0,41	0,29
Combinação Bandas 5 e 7	0,35	0,22
Combinação Bandas 3, 4 e 5	0,42	0,31
Combinação Bandas 3, 4 e 7	0,41	0,30
Combinação Bandas 3, 5 e 7	0,36	0,23
Combinação Bandas 4, 5 e 7	0,37	0,25

O índice Global foi sempre acima do índice Tau, concordando com a citação de Brites (1996). Segundo esse autor, os valores mais elevados do índice Global estão superestimando a avaliação de exatidão. O posicionamento intermediário da curva do coeficiente Tau deve-se à maneira como cada índice contempla a concordância casual em sua formulação. Segundo Brites (1996), o índice Global sempre resultará em valores mais altos que Kappa e Tau, superestimando a avaliação da exatidão, uma vez que não considera os erros de omissão e comissão implícitos no restante da matriz. Já o índice Kappa, ao calcular a concordância casual, inclui os elementos da diagonal principal, fazendo com que essa concordância seja superestimada, reduzindo o valor do índice. Sendo assim, em virtude de considerar em sua formulação a concordância casual *a priori*, o índice Tau situa-se entre os extremos que representam as outras duas situações, ou seja, a total desconsideração da casualidade e sua superestimação. Depreende-se, portanto, que esse seja o índice que representa com mais segurança a exatidão de processos de classificação.

Os valores do índice Tau indicaram que a acurácia do mapeamento apresentou valores baixos apesar da análise estatística ter demonstrado diferenças estatísticas entre as bandas apresentadas na Tabela 1. Considerando-se a classificação de índices de acurácia proposta por Lands & Koch (1977), podemos enquadrar esses valores como razoável, Tau entre 0,20 e 0,40, e ruim, Tau entre 0,00 e 0,20.

As melhores classificações foram as das imagens que apresentaram o índice Tau acima de 0,30, que são o NDVI e as combinações das bandas 3-4, 3-4-5 e 3-4-7. O NDVI contrastou melhor a diferença de reflectância entre o vermelho (banda 3) e infravermelho-próximo (banda 4) em comparação ao outro índice de vegetação usado, o SAVI. O NDVI, ao lado da combinação das bandas 3 e 4, foram os que apresentaram melhor exatidão de mapeamento. A melhor exatidão atribuída ao NDVI deve-se também ao fato de terem sido usadas, nessas classificações, somente coberturas com predomínio vegetal verde. Pode-se entender que o predomínio verde das coberturas e com maior vigor vegetativo proporcionaram uma grande reflectância na banda 4 e uma grande absorção na banda 3. Portanto, essa

diferença pode ter acarretado um melhor desempenho do NDVI em relação às outras classificações. Contudo, apesar de ter proporcionado o melhor índice, o NDVI, também apresentou valores baixos de exatidão de mapeamento, assim como todas as outras classificações. Esse fato pode confirmar a precaução de Sader et al. (1989) ao usarem NDVI para mapeamento de áreas florestais em regiões montanhosas, visto que essa apresentou-se mais adequada para regiões de relevo mais suavizado.

As combinações de bandas demonstraram um melhor desempenho em relação às classificações por bandas unitárias, concordando com as observações de Batista et al. (1990) e Silva et al. (1994), segundo as quais a melhoria da classificação é obtida com o incremento do número de bandas utilizadas na análise. Esses autores ressaltam, ainda, que o máximo desempenho de classificação é atingido com a utilização de três bandas espectrais, o que concorda, em parte, com os resultados deste trabalho, em que a combinação das bandas 3-4-5, 3-4, além da transformação NDVI, foram as classificações com os melhores índices de exatidão.

As bandas 4 e 3, apesar da grande reflectância e absorbância de vegetação, respectivamente, apresentaram valores muito baixos para o índice Tau (0,20 para a banda 4 e 0,17 para a banda 3). Por outro lado, essas bandas estiveram presentes em todas as classificações que apresentaram os melhores índices de exatidão de mapeamento. A diferença estatística entre as bandas apresentadas na Tabela 1 não descarta uma possível similaridade entre as classes classificadas pelo algoritmo da máxima verossimilhança. A interseção entre essas curvas é chamada de confusão espectral entre classes. Portanto, os baixos índices de exatidão de mapeamento demonstram confusão espectral para algumas classes devido à similaridade das coberturas e ao efeito das sombras.

4 CONCLUSÃO

O mapeamento do uso da Terra na Zona da Mata Mineira, por sensoriamento remoto, apesar da pouca diversidade de classes de uso encontrada na região, apresentou limitações. Os resultados indicam que o mapeamento digital automatizado, com o uso de imagens Landsat e fotografias aéreas não convencionais de áreas cafeeiras nessa região, poderá

ser usado apenas para referência de localização dessas áreas e não para limitar e quantificar lavouras. Tal situação está relacionada à similaridade espectral, à topografia acidentada da região, com o consequente sombreamento das imagens, e à fragmentação das lavouras de café, localizadas em áreas contíguas a matas nativas. Espera-se que aplicação dessa metodologia em regiões de relevo mais suave e com uma cafeicultura distribuída em lavouras mais extensas e homogêneas, produza resultados mais precisos.

Para melhorar a acurácia do mapeamento da cafeicultura de regiões montanhosas, sugere-se a exploração do aspecto multitemporal das imagens, em associação com a análise espectral e a correção da classificação automática por meio da interpretação visual.

5 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais –FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudo e ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – CBP&D Café, pelo apoio financeiro para a execução do trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, H. M. R.; VIEIRA, T. G. C.; BERNARDES, T.; LACERDA, M. P. C.; VOLPATO, M. M. L. Dinâmica espaço-cultural de ambientes cafeeiros de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 241, p. 38-49, 2007.
- BATISTA, G. T.; TARDIN, A. T.; CHEN, S. C.; DALLEMAND, J. F. Avaliação de produtos HRV/SPOT e TM/LANDSAT na discriminação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 3, p. 379-386, 1990.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SE. 24 Rio Doce; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1987. 544 p.
- BRITES, R. S. **Verificação de exatidão em classificação de imagens digitais orbitais**: efeitos de diferentes estratégias de amostragens e avaliação de índices de exatidão. 1996. 101 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.
- CAETANO, M.; SANTOS, T.; GONÇALVES, L. Cartografia de ocupação do solo com imagens de satélite: estado da arte. In: ENCONTRO DE UTILIZADORES DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, 7., 2002, Oeiras. **Actas...** Oeiras, 2002. CD-ROM.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.
- CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. New York: The Guilford, 1987. 551 p.
- CARVALHO, L. M. T. de; CLEVERS, J. G. P. W.; SKIDMORE, A. K.; JONG, S. M. de. Selection of imagery data and classifiers for mapping Brazilian semideciduous Atlantic forests. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, n. 3, p. 176-186, 2004.
- CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: Unicamp, 1999. 170 p.
- CUNHA, A. M.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F.; REZENDE, S. B.; RIBEIRO, L. S. Mosaico digital de aerofotos não-convencionais na avaliação de recursos naturais: estudo de caso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, 2006.
- DISPERATI, A. A. Fotografias aéreas de pequeno formato para recuperação de áreas degradadas. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. de (Eds.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa, MG: UFV/SOBRAD, 1998. p. 87-94.
- DISPERATI, A. A. **Obtenção e uso de fotografias aéreas de pequeno formato**. Curitiba: UFPR/FUPEF, 1991. 290 p.
- EPIPHANIO, J. C. N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A. R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 3, 1994.
- FERNANDES, M. M. **Caracterização de solos e uso atual empregando aerofotos não-convencionais nas sub-bacias Marengo, Palmital e Silibar - Rio Turvo Sujo, MG**. 1996. 107 f. Dissertação (Mestrado em Solos Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

- HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; NICHESON, J. E.; GOETZ, S. J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multidade, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, n. 1, p. 11-27, Jan. 1991.
- Jl, C. Y. Delineating agricultural field boundaries from TM imagery using dyadic wavelet transforms. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 51, n. 6, p. 268-283, Dec. 1996.
- LACERDA, M. P. C.; VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M. Estimativa de áreas cafeeiras ocupadas pela cafeicultura em regiões produtoras de Minas Gerais por meio de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos expandidos...** Brasília: Embrapa Café, 2000. v. 2, p. 1356-1359.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Saint Louis, v. 33, n. 1, p. 159-174, Mar. 1977.
- MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. **Landsat MSS and TM postcalibration on dynamic ranges of exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures**. Lanham: EOSAT, 1986. 21 p. (Landsat technical notes, 1).
- MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 3, 2004.
- MOREIRA, M. A.; BARROS, M. A.; FARIA, V. G. C.; ADAMI, M. Tecnologia de informação: imagens de satélite para o mapeamento de áreas de café de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 241, p. 27-37, 2007.
- QUINTEIRO, F. Q. L. **Levantamento do uso da terra e caracterização de ambientes da bacia hidrográfica do rio Turvo Sujo, com a utilização de aerofotos não-convencionais**. 1997. 91 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- SADER, S.; WAIDE, R.; LAWRENCE, W. Tropical forest biomass and successional age relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 28, n. 2, p. 143-156, 1989.
- SHEVYRNOGOV, A. P.; SIDKO, A. F. Remote diagnostics of vegetation covers by spectral brightness of plants. **Advances in Space Research**, Oxford, v. 16, n. 8, p. 185-188, 1995.
- SILVA, H. R.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Técnicas de geoprocessamento na estimativa das áreas de culturas de verão. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO, 1994, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Sagres, 1994. p. 23-32.
- VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M.; LACERDA, M. P. C.; VEIGA, R. D.; EPIPHANIO, J. C. N. Crop parameters and spectral response of coffee (*Coffea arabica* L.) areas within the state of Minas Gerais, Brazil. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 111-118, 2006.